

Auswirkungen der Turbulenz und inhomogener Streuteilchenkonzentrationen auf das Meßwertensemble eines Laser-Doppler-Anemometers

Einleitung

Die Strömungsgeschwindigkeitsmessung nach dem Laser-Doppler-Verfahren beruht auf der Geschwindigkeitsmessung in der Strömung mitgeführter Teilchen, in Wasser z. B. Luftbläschen /1/. Schlupflosigkeit der Teilchen vorausgesetzt, entsteht ein Ensemble von Abtastungen der Strömungsgeschwindigkeit, aus dem die zeitgemittelten Kenngrößen $\bar{v}, \overline{v^2}$ bestimmt werden. Aufgrund der räumlich-statistischen Teilchenverteilung wird das LDA-Meßwertensemble ursächlich durch das während der Meßzeit T_M erfaßten Strömungsvolumen generiert, es existiert eine Differenz (Bias) zwischen den statistischen Eigenschaften des Meßwertensembles und den gesuchten Geschwindigkeitskenngrößen. Der LDA-Meßprozeß ist nicht ergodisch.

Bias-Hauptursache ist die Geschwindigkeits-Proportionalität der Meßhäufigkeit, mathematisch durch die Anzahl das Meßvolumen passierender Streuteilchen pro Zeiteinheit (Meßvolumenrate) $S_0(t)$ beschrieben

$$S_0(t) = c_V \cdot A_{\perp} \cdot |\vec{v}(t)| \quad (1)$$

c_V : Volumenkonzentration der Streuteilchen; A_{\perp} : Meßvolumenprojektionsfläche in Geschwindigkeitsrichtung

Zur Ableitung von Berechnungsverfahren der Zeitmittelwerte aus dem LDA-Meßwertensemble wird z. Z. die Volumenkonzentration c_V als konstant in Raum und Zeit angenommen. Dies führt in turbulenten Strömungen zur Überbewertung höherer Geschwindigkeiten im LDA-Meßprozeß, resultierend in einem positiven Bias β_1 für \bar{v} als Mittelwert 1. Ordnung

$$\beta_1 = (N^{-1} \sum_{i=1}^N v_i - \bar{v}) / \bar{v} = Tu^2 > 0 \quad (2)$$

Tu: Turbulenzgrad

Darüber hinaus existieren LDA-Anwendungen, bei denen eine Abhängigkeit der Streuteilchen-Volumenkonzentration von der Strömungsgeschwindigkeit $c_V = f(v(t)) \neq \text{konst}$ vorliegt, z. B. auch im Nachstrom von Schiffspropellern. Abb. 1 zeigt ein Meßbeispiel für negativen Bias im Einflußbereich des Spitzenwirbels eines Modellpropellers /2/.

Es sind bisher keine quantitativen Vorhersagen des LDA-Bias unter Einbeziehung inhomogener Streuteilchenkonzentrationen veröffentlicht.

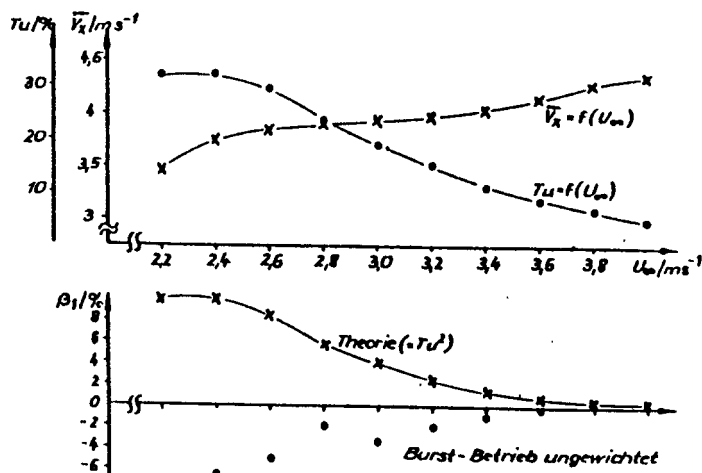


Abb. 1:

Variation der Geschwindigkeitsschwankungen im Nachstrom des Modells eines Mariner-Propellers ($R = 76\text{cm}$, $n = 33,7\text{s}^{-1}$) bei $r/R = 0,925$

Methodik

Als Mittel zur quantitativen Vorhersage des Bias bietet sich die Rechnersimulation des LDA-Meßwerterfassungs- und -verarbeitungsprozesses unter Einbeziehung einer simulierten turbulenten 1D- bzw. 3D-Strömung an. In Erweiterung von /3/ und /4/ wurde ein PC-Programm BIASSIM in Pascal erstellt, mit dem

- die Simulation einer turbulenten Strömung mittels Autoregressiv-Prozeß 1. oder 2. Ordnung (= Geschwindigkeitsserie)
- die Simulation einer Teilchenbesähung beliebiger Dichte ohne und mit zusätzlicher Konzentrations-Geschwindigkeitsabhängigkeit (= Teilchenserie)
- die Simulation von Signalerfassungs- und -verarbeitungsverfahren (= Prozessorserie)
- die Anwendung bekannter Verfahren zu gewichteten Mittelung des Meßwertensembles und der Turbulenzspektrumbestimmung auf die Teilchen- bzw. Prozessorserie

erfolgt. Die Simulationsschritte sind einzeln ausführbar, Vorgaben und Ergebnisse einschl. der Serien werden als Datenfiles auf dem PC gespeichert. Der Bias ist durch Vergleich mit den Kenngrößen der verwendeten Geschwindigkeitsserie berechenbar.

Simulationsergebnisse

Die Auswirkungen von Turbulenz und nichtkonstanter Streuteilchenkonzentration als a-priori-Strömungskenngrößen auf den Bias sind an den statistischen Parametern der Teilchenserie ablesbar und repräsentieren den gesamten LDA-Meßprozeß bei vernachlässigbarem Einfluß der Meßplatzelektronik als Einsatzfall, der in der Praxis anzustreben ist. Die gesuchten Zusammenhänge treten isoliert, und daher besonders deutlich in turbulenten 1D-Strömungssituationen auf. Bei der Simulation der Geschwindigkeitsserie sind statistische Unsicherheiten durch formgetreue Belegung mit Stützwerten (100 je integrales Zeitmaß T_E) und durch die Meßzeit $T_M (= 5000 T_E)$ minimiert. Abb. 2 zeigt die quadratische Turbulenzgrad-Bias-Beziehung gemäß (2), unabhängig von der Datendichte

$$N_D = S_0(t) \cdot T_E \quad (3)$$

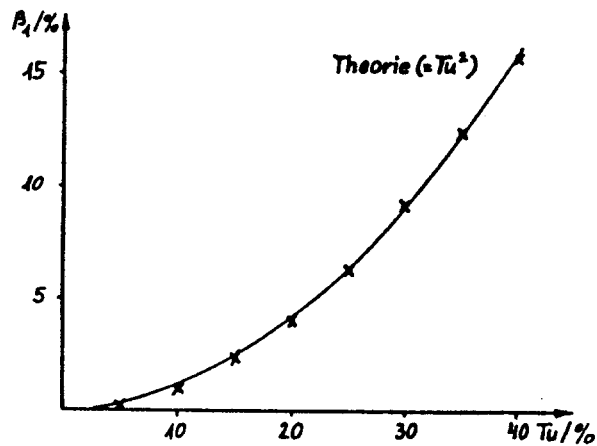


Abb. 2:
LDA-Bias einer simulierten 1D-Strömung in Abhängigkeit von der Turbulenz

Die in Abb. 3 und 4 enthaltene Abhängigkeit der Streuteilchenkonzentration von der Geschwindigkeit ist linear angenommen,

$$c_V = m_c * v(t) \quad (4)$$

und ist normiert dargestellt

$$m_c = (m_c * N_D) / \bar{v} \quad (5)$$

Für linear geschwindigkeitsabhängige Streuteilchenkonzentrationen ergibt sich:

- die Unabhängigkeit des Bias von der Datendichte,
- keine Bias-Kompensation des zusätzlichen Konzentrationseinflusses bei Aufenthaltzeitwichtung unabhängig von der Datendichte,
- eine Bias-Kompensation unabhängig von der Ursache in Abhängigkeit von der Datendichte bei der Zeitdifferenzwichtung, jedoch erst bei hohen Datendichten $N_D > 10$ eine gute Annäherung an den Zeitmittelwert.

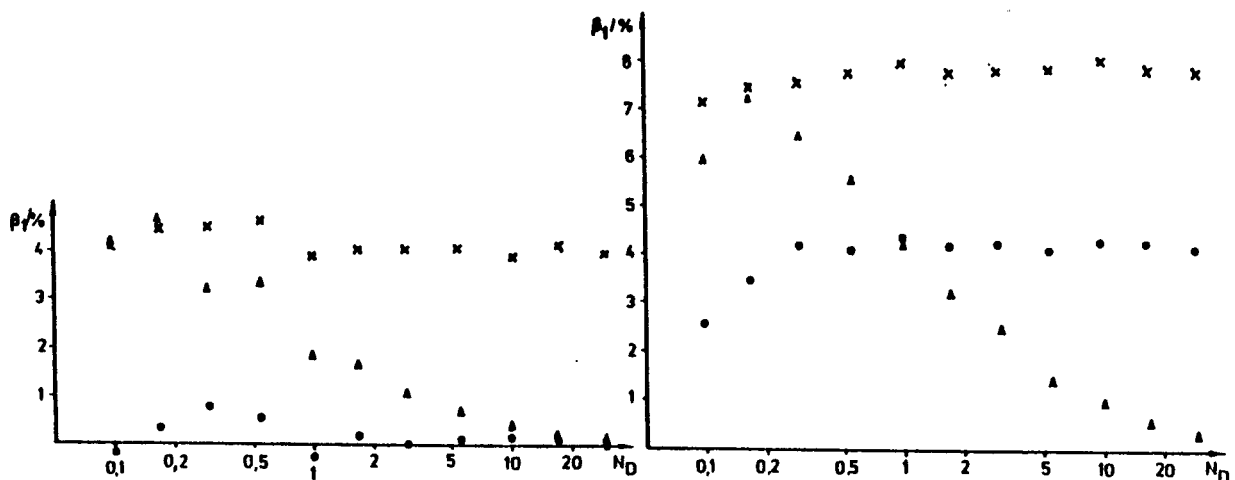


Abb. 3:

LDA-Bias einer simulierten 1D-Strömung mit $Tu = 20\%$ in Abhängigkeit von der Datendichte Links: ohne; rechts: mit linear geschwindigkeitsabhängiger Streuteilchenkonzentration $m_c = 1$

Legende: x: Bias des Meßwertensembles; Δ : Bias bei Zeitdifferenzwichtung; \bullet : Bias bei Aufenthaltzeitwichtung

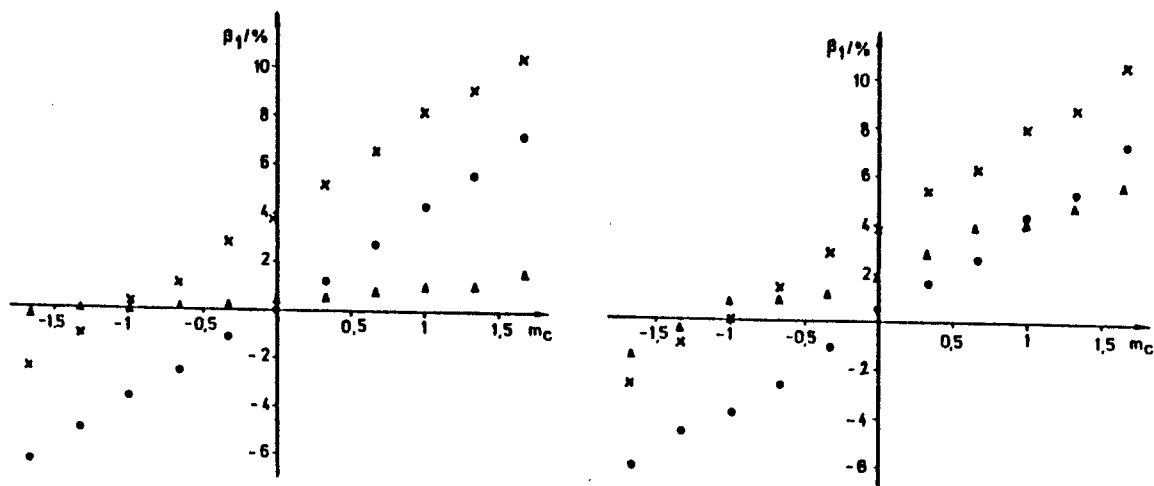


Abb. 4:

LDA-Bias einer simulierten 1D-Strömung mit $Tu=20\%$ bei Variation der geschwindigkeitsabhängigen Streuteilchenkonzentration. Links: $N_D=10$; rechts: $N_D=1$; Legende wie Abb. 3

Schlußfolgerungen

Turbulenzgrad und geschwindigkeitsabhängige Streuteilchenkonzentration haben einen wesentlichen Einfluß auf den LDA-Meßprozeß und spiegeln sich im Bias wider. Mit dem PC-Programm BIASSIM steht ein Werkzeug bereit, diese a-priori-Informationen über den Strömungszustand am Meßort quantitativ in die Optimierung des Meßprozesses zum Erhalt der zeitgemittelten Strömungskenngrößen einzubeziehen.

Literatur

- /1/ Albrecht, H.-E.: Laser-Doppler-Strömungsmessung. Berlin: Akademie-Verlag, 1986
- /2/ Fuchs, W.; Kilian, R.: Laser-Doppler-Anemometrie im Modellpropellerstrahl. Rostocker Schiffstechnisches Symposium Sept./Okt. 1991, Fachsektion Meßtechnik
- /3/ Tropea, C.: Turbulence-induced spectral bias in laser anemometry. AIAA-Journal 25(1987) S. 306-309
- /4/ Buchhave, P.; v. Benzon, H.-H.; Rasmussen, C. N.: LDA bias: comparison of measurement errors from simulated and measured data. Proc. 5th Int. Symp. on Appl. of Laser Anemometry to Fluid Mechanics Lisbon, July 1990

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr. C. Tropea und Herrn Dr. A. Melling vom Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen für die Zusammenarbeit im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens, gefördert von der Volkswagen-Stiftung Hannover.

Dr.-Ing. habil. Werner Fuchs, cand. ing. Holger Nobach
 Universität Rostock, Fachbereich Elektrotechnik
 Einsteinstraße 2
 D-O-2500 Rostock 6